

伝導冷却型高温超電導コイルの高速励磁に対する熱的安定性に関する研究

著者	櫻井 周平
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	87
号	1
ページ	106-107
発行年	2018-08
URL	http://hdl.handle.net/10097/00123455

修士学位論文要約（平成30年3月）

伝導冷却型高温超電導コイルの高速励磁に対する 熱的安定性に関する研究

櫻井 周平

指導教員：津田 理

Study on AC Thermal Stability of Conduction-Cooled High Temperature Superconducting Coil High Speed Excitation

Shuhei SAKURAI

Supervisor: Makoto TSUDA

In recent years, a compact medical accelerator in which a conduction cooling type high temperature superconducting coil is applied to a particle control bending electromagnet is expected. However, since the high-speed excitation of the superconducting coil at the time of treatment causes heat generation due to the AC loss, there is a problem with the thermal stability of the coil. In order to thermally stabilize the coil, it is necessary to reduce the AC loss during coil excitation and suppress the temperature rise of the coil. Therefore, in this paper, the excitation speed and the AC loss characteristic with respect to the excitation waveform and the temperature distribution characteristics in the coil of the conduction cooling type high temperature superconducting coil for the accelerator were studied.

1. はじめに

近年、伝導冷却型高温超電導(HTS)コイルを粒子制御用偏向電磁石に適用した小型医療用加速器が期待されている。しかし、治療時の高速励磁によって、超電導コイルは交流損失による発熱を生じるため、熱的安定性に課題を抱えている。コイルの熱的安定化のためには、励磁時の交流損失の低減化とコイルの温度上昇抑制が考えられる。そのため、本論文では、加速器用伝導冷却型高温超電導コイルの励磁速度や励磁波形に対する交流損失特性とコイル内温度分布特性を明確にした上で、伝導冷却型高温超電導コイルの熱的高安定化の実現に対する指針を検討した。

2. 高速励磁時の HTS コイルの交流損失特性

コイル用高温超電導線材として、GdBCO 線材の適用が期待されているが、一般的にクエンチ時の安定性を考慮し、安定化 Cu 層が設けられている。そのため、Cu 層を含む線材を用いてコイルを作製し、交流損失を測定した。交流損失測定方法は先行研究のヒータ制御に基づく熱的測定法を用いた¹⁾。HTS コイルの諸元を表1に示す。また、実験条件を表2に示す。コイルへの通電は実際の加速器コイルへの通電を想定した台形波通電を行い、交流損失の励磁速度依存性を評価した。実験結果を図1に示す。これより、高速励磁時の伝導冷却型 HTS コイルの交流損失は励磁速度の増加とともに増加し、Cu 層や伝導冷却用 Cu 板の渦電流損失が支配的であることが

分かった。一方、超電導体のヒステリシス損失は励磁速度に依存せず一定となることを確認した。

表1 HTS 線材とコイルの諸元

HTS Tape(GdBCO)	
Superconducting layer thickness [μm]	2.7
Copper stabilizing layer thickness [μm]	75.0
Tape thickness [mm]	0.22
Tape width [mm]	5.0
HTS coil	
Shape	Double pancake
Coil radius [mm]	70
Coil height [mm]	10.2
Number of Turns	50
Self-inductance	

表2 実験条件

Control temperature [K]	20
Current amplitude [A]	250
Electrification cycle	10
Current sweep rate [A/s]	50/10/150/200/250

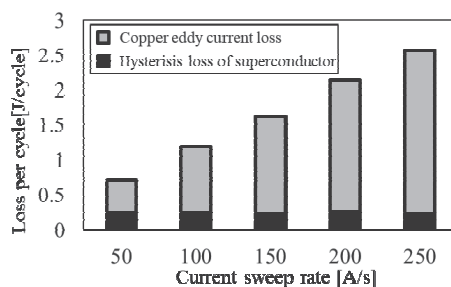


図1 伝導冷却型 HTS コイル損失内訳の励磁速度依存性

3. 高速励磁時の HTS コイル内温度分布特性

HTS コイル内の温度測定は、T 型熱電対を用いた。表 3 に用いた線材と HTS コイルの諸元を示す。また、図 2 に示すように、コイル径方向に均等になるように 6 個の熱電対を配置し、各励磁速度におけるコイル内最大温度を測定した。また、冷却パスを熱電対付近に取り付け、コイル温度上昇抑制効果について検討した。実験条件を表 4 に示す。なお、本実験では HTS コイルはスタイロフォームを用いて断熱し、液体窒素の浸漬冷却を行うことで、コイル電流リードからの伝導冷却を模擬した。

図 3 に冷却パスがない場合、図 4 に冷却パスを導入した場合の HTS コイルの各励磁速度に対する最大温度をそれぞれ示す。図 3 より、コイル内最大温度は、励磁速度が増加するほど増加していることから、交流損失特性と同様の傾向であることがわかる。また、コイル内に温度勾配が存在し、コイル内側の温度上昇が顕著となっていることがわかる。図 4 より、スリットがある場合は温度上昇を抑制しているが、スリットがない場合は逆に温度上昇を助長していることがわかる。これより、HTS コイルの温度上昇を抑制するためには、冷却パスにおける渦電流損失を考慮し、スリットを入れることによって冷却効果を高める設計にする必要があることがわかった。

表 3 HTS 線材とコイルの諸元

HTS Tape(GdBCO)	
Superconducting layer thickness [μm]	2.7
Copper stabilizing layer thickness [μm]	75.0
Tape thickness [mm]	0.22
Tape width [mm]	5.0
HTS coil	
Shape	Single pancake
Coil radius [mm]	70
Coil height [mm]	5.0
Number of Turns	50
Self-inductance	

表 4 実験条件

Control temperature [K]	77
Current amplitude [A]	80
Magnetic field amplitude @center	
Electrification cycle	8000
Magnetic field sweep rate[T/s]	4.5/9/18/36

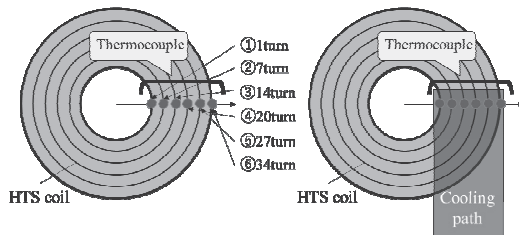


図 2 コイルの熱電対取り付け位置と冷却パス取り付け位置

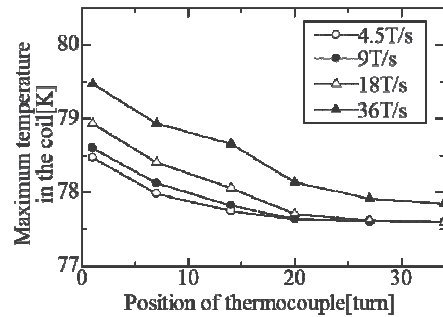
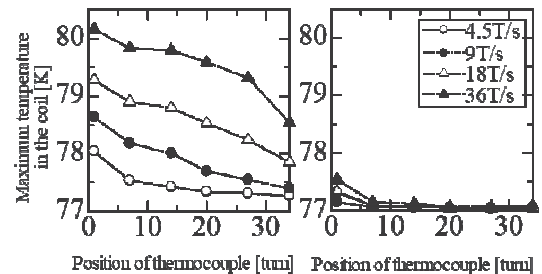


図 3 HTS コイルの各励磁速度に対する最大温度



(a) 冷却パス(スリットなし) (b) 冷却パス(スリットあり)

図 4 冷却パスを取り付けた場合の

HTS コイルの各励磁速度に対する最大温度

4. まとめ

本研究では、伝導冷却型 HTS コイルの高速励磁時の交流損失特性とコイル温度分布特性を検討した。本検討で得られた結果を以下に示す。

①伝導冷却型 HTS コイルの交流損失は、励磁速度が増加するほど増加し、超電導のヒステリシス損失は小さく、渦電流損失が支配的である。

②伝導冷却型 HTS コイルのコイル内最大温度は、励磁速度が増加するほど増加し、Cu 層の渦電流損失が温度上昇に大きな影響を与えていると考えられる。また、コイル内に温度勾配が存在し、コイル内側の温度上昇が顕著である。

③スリット付き冷却パスを用いることで、渦電流損失を抑えつつ、効果的にコイルの温度上昇の抑制している。

以上の結果より、伝導冷却型 HTS コイルの熱的安定性を高めるためには、安定化 Cu 層の薄い HTS 線材を採用し、コイル内側にスリット付き冷却パスを導入することが良いということがわかった。

文献

1)N.Fukushima:” Basic study on AC loss characteristics of refrigerator cooled type high temperature superconducting coil” Master's thesis Tohoku univ.(2015)